第 39 卷　第 5 期
2022 年 10 月

应　用　力　学　学　报
Chinese Journal of Applied Mechanics

Vol. 39 No. 5
Oct. 2022

文章编号:1000-4939(2022)05-0901-07

超深井下射孔弹侵彻超强砂岩的 ALE 仿真

窦益华,徐浩,李明飞

(西安石油大学机械工程学院, 710065 西安)

摘　要:随着完钻井深不断增加,储层岩石压实度、强度和地层压力也不断增加,需采用超强射孔弹射穿污染带,超强弹-超强靶-高围压组合将增加侵彻分析的难度。应用 LS-DYNA 软件,结合 ALE 算法,以某油田井下射孔为例,建立无围压和 50 MPa 围压下 HS45-5 型超强弹-枪-液-套管-砂岩三维模型。通过建立非反射边界条件,消除爆轰波对射流成型和效果的干扰;通过调整关键部位网格密度、优化不同接触面间的网格协调,减少数值畸变与网格数量,提高分析精度,降低机时。研究表明:13 μs 时,射流能量峰值达 60 kJ,占总能量的 23%,随后急剧衰减,850 μs 时衰减为零;16 μs 时,射流速度峰值达 6 300 m/s;50 MPa 围压下穿深为 560 mm,较无围压下降低了 20%。通过本研究可为井下超强弹侵彻高围压超强靶的仿真分析提供参考。

关键词:射孔侵彻;超强弹;高围压;LS-DYNA;ALE 算法

中图分类号:TE925.3　　**文献标志码:**A　　**DOI:**10.11776/j.issn.1000-4939.2022.05.011

ALE simulation of ultra deep downhole perforating projectile penetrating super strong sandstone

DOU Yihua, XU Hao, LI Mingfei

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Shiyou University, 710065 Xi'an, China)

Abstract: With the increase of drilling depth, the compaction, strength and formation pressure of reservoir rock are also increasing, so it is necessary to use super-strong perforating projectile to penetrate the pollution zone, and the combination of super-strong projectile, super-strong target and high confining pressure will increase the difficulty of penetration analysis. In this paper, using LS-DYNA software, combined with ALE algorithm, taking an oilfield downhole perforation as an example, the HS45-5super-strong bullet-gun-liquid-casing-sandstone three-dimensional model is established without confining pressure and 50 MPa confining pressure. The interference of detonation wave on jet forming and effect is eliminated by establishing non-reflective boundary conditions. By adjusting the mesh density of key parts and optimizing the mesh coordination between different contact surfaces, the numerical distortion can be reduced, the analysis accuracy can be improved, and the machine time can be reduced. The results show that the peak value of jet energy reaches 60 kJ at 13 μs, accounting for 23% of the total energy, and then decays sharply and rea-

收稿日期:2021-08-21　　**修回日期:**2022-07-10
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51374171)
通信作者:李明飞。E-mail:limf88@126.com。
引用格式:窦益华,徐浩,李明飞. 超深井下射孔弹侵彻超强砂岩的 ALE 仿真[J]. 应用力学学报,2022,39(5):901-907.
DOU Yihua, XU Hao, LI Mingfei. ALE simulation of ultra deep downhole perforating projectile penetrating super strong sandstone[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(5):901-907.

ches zero at 850 μs. At 16 μs, the peak velocity of jet reaches 6 300 m/s. The penetration depth under 50 MPa confining pressure is 560 mm, which is 20% lower than that without confining pressure. The research in this paper can provide a reference for the simulation analysis of underground super-strong projectile penetration into super-strong targets with high confining pressure.

Key words: perforation penetration; super projectile; high confining pressure; LS-DYNA; ALE algorithm

由于钻井深度的增大,深井钻井液与储层接触时间较长、储层污染较重,从而导致使用常规射孔弹根本无法达到穿深要求,因此需采用大装药量的射孔弹进行射孔。除此之外,目前射孔方面研究主要模拟地面打靶的无围压工况,超深井下储层围压常超过 50 MPa,因此需开展超强弹侵彻高围压超强靶有限元分析。超强靶(超深储层岩石)和高围压将增加侵彻分析的难度。

现有文献针对超强弹侵彻高围压超强靶分析较少。文献[1]主要研究了相同装药量下不同装药结构对射流侵彻混凝土靶穿深的影响。文献[2]应用 LS-DYNA 软件对某种型号射孔弹超高速金属的射流形成以及作用于钢靶的过程进行了数值模拟。文献[3]进行了射孔弹侵彻砂岩靶实验,分析了药型罩材料、壁厚、开口角度等因素对射流穿深的影响。文献[4]采用 LS-DYNA 软件,固态金属药型罩转化成液态高速金属流体及液态高速金属流体与混凝土介质发生侵彻的过程。文献[5]应用 Workbench 软件,建立了射孔段管柱三维有限元模型,分析了管柱的动力响应规律。文献[6]应用 Workbench 建立了某规格射孔弹侵彻圆柱体应力砂岩的有限元模型。分析了砂岩应力分别为 0、50 MPa 时射孔弹侵彻砂岩的深度。文献[7]采用 LS-DYNA 软件,模拟了矩形射孔弹射流的形成过程及其钢靶侵彻过程。文献[8-11]用 LS-DYNA 软件,对固态金属药型罩转化成液态高速金属流体及液态高速金属流体与混凝土介质发生侵彻的过程进行了有限元模拟。文献[12]应用 LS-DYNA 软件对聚能装药在不同起爆方式下的射流形成过程进行了三维数值模拟。文献[13-14]用 AUTODYN 对油田使用的射孔弹的爆轰压垮药型罩过程和射流侵彻套管过程进行了模拟计算。文献[15-17]主要研究了 ALE 算法在相关领域的应用,给出了相关的研究方法和技巧,为本研究提供借鉴和参考。

综上所述,目前文献对于超深井下射孔爆轰及侵彻深度研究很不完善,射孔侵彻研究主要集中在井深较浅的工况下,实际超深井下射流成型及侵深度尚不清楚,可能会导致现有的研究结论与实际井下穿深存在较大差异。本研究针对这一问题进行研究,建立 50 MPa 围压下 HS45-5 型超强弹-枪-液-套管-砂岩三维模型,应用 LS-DYNA 软件,应用 ALE 算法进行有限元分析。研究通过以下 3 种方法:①对无围压工况下射孔弹爆轰过程进行了模拟;②通过在后处理中定义载荷曲线,对靶板施加 50 MPa 围压,模拟超深井下工况;③通过对超深井下射流侵彻过程的数值模拟,分析了射孔爆轰过程中能量转换、射流头部速度变化。通过本研究可为实际井下超强弹侵彻高围压超强靶的仿真分析提供方法参考。

1 ALE 算法描述流固耦合动力学方程

LS-DYNA 有限元模拟中网格运动是通过控制网格的运动速度 $\hat{v}$ 或控制参考材料速度 ω 来实现的,即

$$\omega(X,t) = \frac{\partial X(X,t)}{\partial t} = X,t[x] \tag{1}$$

$$\hat{v}(X,t) = \frac{\partial \hat{u}[x(X,t)-X]}{\partial t} = \frac{\partial x(X,t)}{\partial t} = \frac{\partial x}{\partial t}|x = x_{t[X]} \tag{2}$$

$$v(X,t) = \frac{\partial x}{\partial t}|x = \frac{\partial x}{\partial t}|x + \frac{\partial x(X,t)}{\partial X}\frac{\partial X}{\partial t}|x \tag{3}$$

$$\frac{\partial x(X,t)}{\partial X} \times \frac{\partial X}{\partial t}|x = v - \hat{v} \tag{4}$$

式中:$X,t[x]$ 为流体坐标 x 固定的情况下对流体坐标的时间导数;$x(X,t)$ 为某时刻 x 固定情况下的流体坐标。

结合式(1)、式(2)、式(4),得到 ALE 描述下流固耦合网格速度公式为

$$\hat{v} = v - \frac{\partial x(X,t)}{\partial X}\omega \tag{5}$$

应用 LS-DYNA 软件,结合本节 ALE 算法的内核,即可实现固态金属药型罩转化成液态高速金属流体及液态高速金属流体与混凝土介质发生侵彻的过程。

2　有限元模型建立及动态仿真过程

2.1　模型参数及材料参数确定

为了研究超深井下 HS45-5 射孔弹射流能量转换、射流速度变化及穿深，建立射孔弹-射孔枪-射孔液-套管-砂岩靶模型。模型参数：井深 5 500 m、射孔段深度 5 000 m，地层压力梯度 1.0，射孔位置围压 50 MPa，HS45-5 射孔弹，炸高 21 mm；套管外径 178 mm，壁厚 12 mm；射孔枪外径 102 mm，壁厚 6 mm。建模所需材料特性参数如表 1 所示，包括套管参数、射孔枪参数、射孔液参数、砂岩靶参数。

表 1　仿真模型材料特性

Tab. 1　Simulation model material properties

模型组成	材料	状态方程	强度模型	失效模型	密度/(g · cm^{-3})
射孔枪	32CrMn4	None	Kinematic	通用准则	7.85
套管	TP140	Gruneisen	Johnson-cook	通用准则	7.83
射孔液	NULL	Gruneisen	NULL	通用准则	1.0
砂岩	SANDSTONE	Polynomial	Johoson-Holmquist	Johnson-Holmquist	2.63
空气	AIR	Polynomial	NULL	通用准则	1.29×10^{-3}

2.2　有限元模型建立及网格划分

2.2.1　有限元网格划分

在形成聚能射流和侵彻射孔枪和套管的过程中存在大变形和高速流动，ALE 算法(Arbitrary Lagrange-Euler)可以很好地解决大变形和流固耦合问题，因此空气、炸药、药型罩、射孔液均采用 ALE 算法；枪管、套管、弹壳、砂岩采用 Lagrange 算法。枪管与套管、枪管与砂岩、套管与砂岩之间的接触采用侵彻接触类型。根据模型与装药对称，建立 1/4 模型，细化射孔弹及其侵彻轨迹周围的网格，模型分配 8 个单元(包括空气单元)，生成 102 862 个网格，如图 1 所示。通常情况下，建立完整射孔弹模型计算文件较大，计算时间达 72 h，且容易出现计算不收敛。本研究通过建立 1/4 射孔弹模型，调整关键部位网格密度，优化不同接触面间的网格协调，网格数量可减少 50%，计算机时减少 40%。

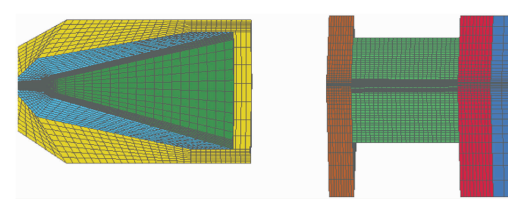


图 1　射孔弹-枪管-射孔液-套管-砂岩有限元模型

Fig. 1　Perforating bullet-barrel-perforating fluid-casing-sandstone finite element model

2.2.2　有限元边界条件设置

由于炸药爆炸会产生爆轰波，在单枚射孔弹数值模拟中，受模型尺寸限制，爆轰波界面反射会影响到射流侵彻过程，对射流成型和穿深效果有所干扰。因此在建模过程中对模型周围空气，以及枪管、射孔液、套管、砂岩靶施加非反射边界条件(non-reflecting boundary)，消除爆轰波的影响，如图 2 所示。

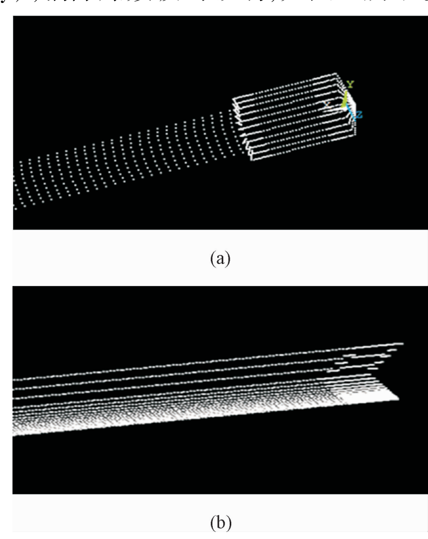


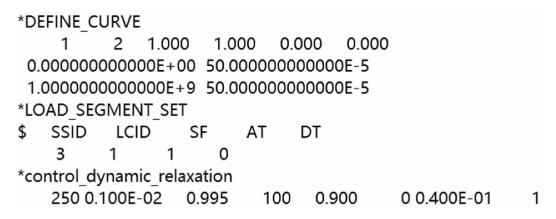
图 2　射孔弹、空气、枪管、射孔液、套管、砂岩非反射边界

Fig. 2　Non-reflective boundaries of perforating projectile, air, barrel, perforating fluid, casing, and sandstone target

2.2.3　初始条件及围压设置

模型建立完成之后，先在 ls-prepost 后处理软件中选择需要添加围压的面，选择定义负载类型，之后在 uedit 软件中修改输出的 K 文件，添加 50 MPa 围压，关键字如图 3，其中 DEFINE_CURVE 关键字为定义一条负载曲线。在文件编辑器 uedit 中分别定义一些关键字如时间步、计算时间、沙漏能控制等。其中时间步设置为 0.9 μs、计算时间设置为 900 μs，

开启沙漏能避免计算出现负体积。



```
*DEFINE_CURVE
     1      2    1.000     1.000     0.000     0.000
  0.000000000000E+00  50.000000000000E-5
  1.0000000000000E+9  50.000000000000E-5
*LOAD_SEGMENT_SET
$    SSID     LCID      SF       AT      DT
     3        1        1       0
*control_dynamic_relaxation
      250 0.100E-02    0.995     100     0.900        0 0.400E-01       1
```

图 3　50 MPa 围压关键字

Fig. 3　Keyword of 50 MPa confining pressure

```
*CONTROL_TIMESTEP
 0.000  0.900000      0    0.000       0      0      1
*CONTROL_TERMINATION
900.0          0   0.00000   0.00000   0.00000
```

图 4　时间步及计算时间设置

Fig. 4　Time step and calculation time setting

2.3　金属射流形成及侵彻过程

如图 5 ~ 图 8 所示，炸药产生的巨大冲击波在轴线方向叠加给金属药型罩施加高温高压，药型罩微元从轴向顶点到侧向底边依次发生变形，在轴线方向上发生激烈碰撞，在尾端形成直径较大的杵体、前端形成细束金属射流，射流依次穿过射孔枪，侵彻套管、射孔液、砂岩靶板。



图 5　10 μs 射流形成

Fig. 5　10 μs jet formation

File:F:\lsdyna\zongti.agdb
Time=15.998

图 6　16 μs 射流侵彻枪管

Fig. 6　16 μs jet penetrates the barrel

File:F:\lsdyna\zongti.agdb
Time=24.998

图 7　25 μs 射流侵彻套管

Fig. 7　25 μs jet penetrates the casing

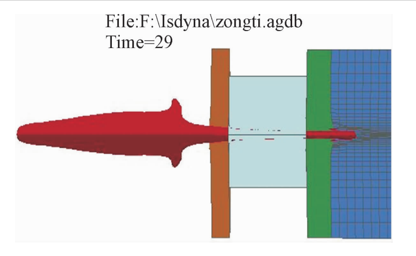


图 8　29 μs 射流侵彻砂岩

Fig. 8　The 29 μs jet penetrates the sandstone

3　射孔爆轰瞬间及侵彻过程能量变化规律

爆轰产物和冲击波将药型罩向中间压垮，形成高速射流，实现爆轰与射流能量转换。图 9、图 10 给出了射孔弹爆轰瞬间炸药能量、药型罩能量随时间变化曲线。如图 9 所示，炸药能量最大值约为60 kJ，炸药能量于 15 μs 内完全释放。如图 10 所示，药型罩能量于 10 μs 左右增至最大，最大值为 14 kJ，占炸药能量的 23% 。由此可知，有 23% 的能量用于侵彻枪管、套管及砂岩。

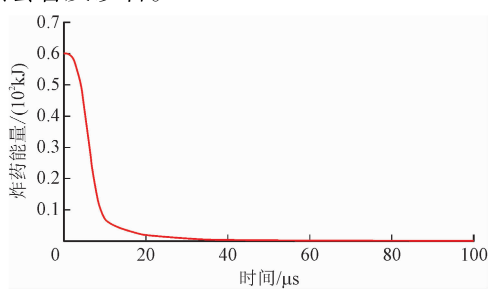


图 9　炸药能量变化曲线

Fig. 9　Explosive energy curve

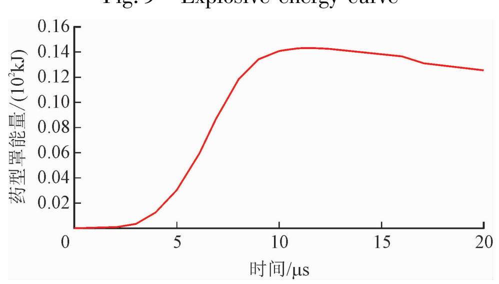


图 10　药型罩能量变化曲线

Fig. 10　Energy change curve of drug type mask

图 11 为前 50 μs 药型罩能量随时间变化的曲线。13 μs 能量达到最大，16 μs 时曲线出现第 1 个拐点，此时射流侵彻枪管并消耗能量，但能量损失较少；穿过枪管后射流侵彻枪管与套管之间的射孔液，射流能量曲线较为平缓，基本无能量消耗；23 μs 时曲线出现第 2 个拐点，此时射流侵彻套管，能量较穿过枪管时消耗更大，射穿套管后进一步扩孔持续消

耗能量;27 μs 时射流开始侵彻砂岩,可以看出此时的射流能量开始迅速下降。图 12 为整个侵彻过程能量随时间变化曲线,从图 12 中可以看出,射流能量在刚开始侵彻砂岩的 210 μs 内能量急速下降;210 μs 之后射流开始出现断裂,能量下降减缓;于 840 μs 左右药型罩能量接近于零,表明侵彻终止。

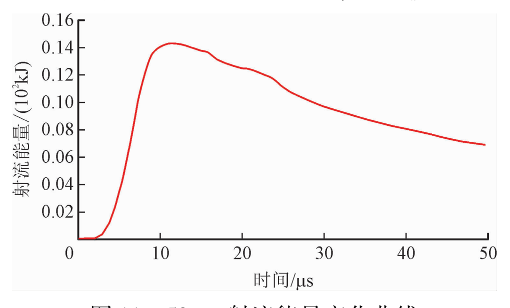


图 11　50 μs 射流能量变化曲线

Fig. 11　50 μs jet energy change curve

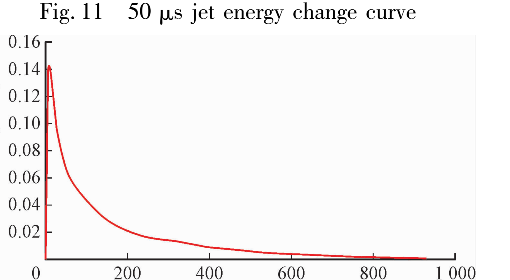


图 12　射流总体能量变化曲线

Fig. 12　Overall jet energy change curve

4　射流速度变化规律

射流速度直接影响射流最终穿深,因此需对侵彻过程中射流速度进行分析。图 13 为射流初形成时的速度云图,此时炸药能量完全释放,药型罩尖端被压垮,形成射流。由图 13(a)可以看出,最大轴向速度出现在射流尖端,最小出现在射流的尾部;由图 13(b)可以看出最大径向速度出现在射流两侧。图 14 为射流断裂时射流速度云图,可以清楚看到速度梯度的存在,射流速度最大集中在头部。

图 15、图 16 为前 50 μs 射流速度、加速度曲线。由图 15 可以看出,16 μs 时,射流速度最大达到 6.3 km/s,对比图 16 加速度曲线,射流加速度为零,16 μs之后加速度均不大于零。因此,16 μs 为射流速度最大时刻,16 μs 之后射流侵彻射孔枪、射孔液、套管及砂岩靶。由图 15 可以看出:16 ~ 18 μs 时,射流侵彻射孔枪,射流速度下降 3% ,射流加速度由 0 变为负值;18 ~ 22 μs,射流穿过射孔液,射流速度无明显变化,射流加速度为 0;22 ~ 25 μs,射流侵彻套管,射流速度下降 8% ,射流加速度再次变为负值,且数值大于 16 ~ 18 μs 时加速度数值;25 μs 之后射流侵彻砂岩靶,射流速度直线减小,加速度为负。

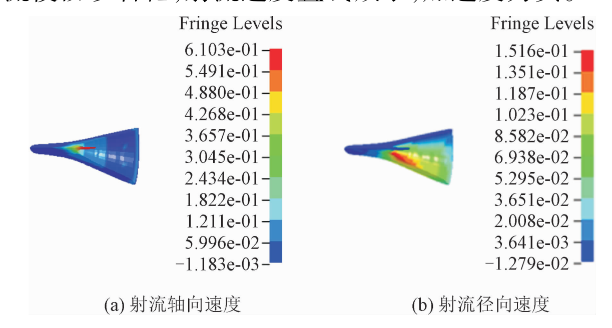


图 13　射流速度云图

Fig. 13　Jet velocity cloud



图 14　射流断裂速度云图

Fig. 14　Jet breaking velocity cloud map

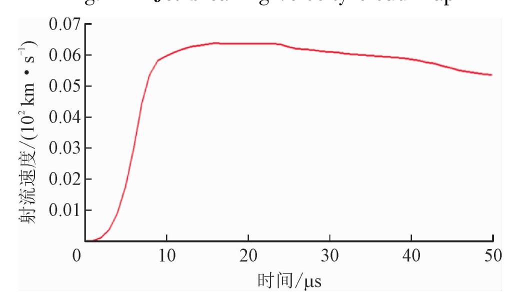


图 15　50 μs 射流速度变化曲线

Fig. 15　50 μs jet velocity change curve

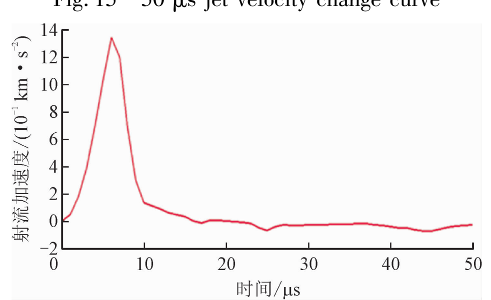


图 16　50 μs 射流加速度变化曲线

Fig. 16　50 μs jet acceleration change curve

图 17、图 18 为整个侵彻过程射流速度、加速度曲线。由图 17 可以看出,在 260 μs 左右,射流速度下降斜率有明显变化,射流速度下降趋势变缓。图 17 中,260 μs 时射流加速度数值明显变小,初步分析为此时射流由于速度梯度存在发生断裂,只有射流头部继续侵彻,其余射流断片不再消耗射流能量。

840 μs之后，射流速度仍然达到 300 m/s，此时射流仍然继续侵彻靶板，但不再继续向前侵彻，而是属于扩孔阶段，直至将射流能量消耗殆尽。

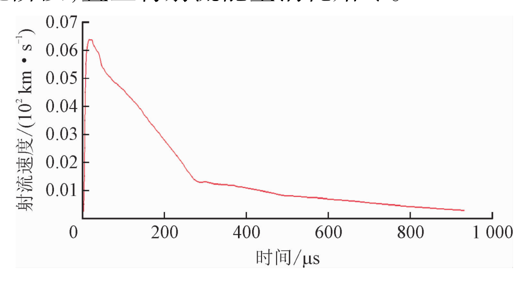


图 17 射流速度变化曲线

Fig. 17 Jet velocity change curve

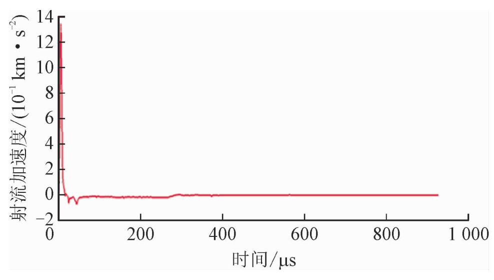


图 18 射流加速度变化曲线

Fig. 18 Jet acceleration change curve

5 不同围压下射流侵彻深度分析

图 19 为无围压和 50 MPa 围压工况下选取不同时间点位移所绘制的位移时间曲线。从图 19 中可以看出：无围压下射流穿深为 700 mm；50 MPa 围压下射流穿深为 560 mm，对比无围压下穿深下降 20%。图 20 为无围压下 HS45-5 射孔弹亲侵彻砂岩试验报告单。由图可知，无围压下 HS45-4 射孔弹穿深为 690 mm，穿深误差为 1.4%，在计算至 840 μs 后，2 种工况下射流穿深几乎不再有变化，此时射流处于扩孔阶段，可以终止计算过程。

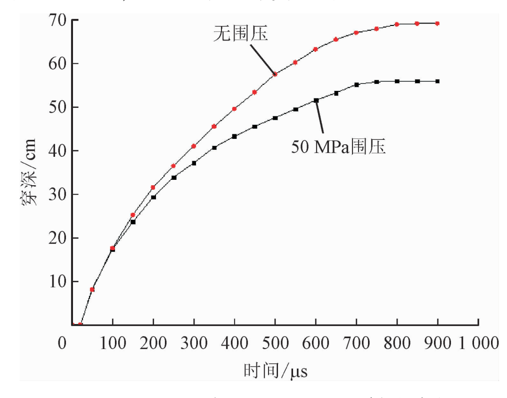
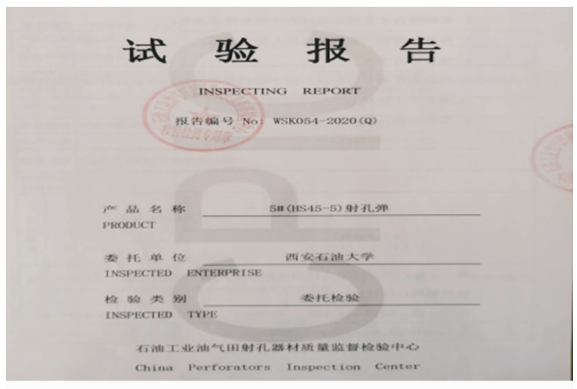


图 19 无围压与 50 MPa 围压射流穿深

Fig. 19 No confining pressure and 50 MPa confining pressure jet penetration depth



试 验 报 告

INSPECTING REPORT

报告编号 No: WSK054-2020(Q)

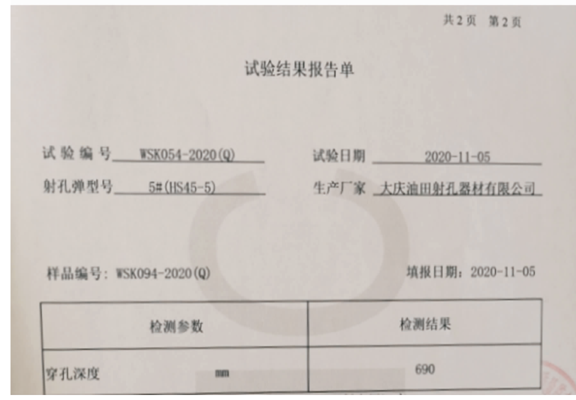
产品名称 PRODUCT 5#(HS45-5)射孔弹

委托单位 INSPECTED ENTERPRISE 西安石油大学

检验类别 INSPECTED TYPE 委托检验

石油工业油气田射孔器材质量监督检验中心

China Perforators Inspection Center



共2页 第2页

试验结果报告单

试验编号 WSK054-2020(Q) 试验日期 2020-11-05

射孔弹型号 5#(HS45-5) 生产厂家 大庆油田射孔器材有限公司

样品编号：WSK094-2020(Q) 填报日期：2020-11-05

检测参数	检测结果
穿孔深度 mm	690

图 20 H45-5 射孔试验结果报告单

Fig. 20 H45-5 perforation test result report

6 结 论

本研究应用 LS-DYNA 软件，模拟超深井下工况，建立 1/4 完整射孔侵彻的三维有限元模型，并在砂岩外围施加 50 MPa 围压，应用 ALE 算法，给定炸药参数，模拟爆轰过程，真正实现了爆轰过程、药型罩固流转化、射流高速侵彻套管的大变形和流固耦合仿真，无围压下射流穿深与试验穿深误差为 1.5%，得到如下结论。

1）通过设置非反射边界条件和调整关键部位网格密度，建立完整的有限元模型，消除爆轰波对射流成型和效果的干扰；减少数值畸变，提高分析精度，降低机时。

2）HS45-5 射孔弹最大能量为 60 kJ，药型罩能量约为 14 kJ，炸药能量转化率为 23%，射流最大速度为 6 300 m/s，当射流速度低于 500 m/s，射流处于扩孔阶段，不再继续向前侵彻。

3）50 MPa 围压下模拟穿深为 560 mm，较无围压下穿深下降 20%，射流在 600 μs 之后侵彻速度明显减慢，在 840 μs 之后侵彻深度不再变化，且射流能量趋近于零，因此在数值模拟中终止时间可设置为

900 μs。

4)本研究通过 ALE 算法模拟射孔爆轰过程及侵彻深度,计算结果与试验数据误差仅为 1.5%,计算无围压下射孔弹的穿深合理,因此可以用 ALE 算法模拟超深井下(50 MPa 围压)射孔爆轰以及射流穿深。

参考文献:

[1] 马建福. 聚能装药结构对混凝土侵彻作用研究[D]. 太原:中北大学,2007.

[2] 张伟,黄俊卿,杨学会,等. 射流侵彻钢靶射孔形状变化趋势数值模拟分析[J]. 系统仿真学报,2013,25(增刊1):107-109.
ZHANG Wei, HUANG Junqing, YANG Xuehui, et al. Numerical simulation analysis of the shape variation trend of steel target perforation by jet penetration[J]. Journal of system simulation,2013,25(S1):107-109(in Chinese).

[3] BARANOV P A, ZHDANOV V L, ISAEV S A, et al. Numerical simulation of the unsteady laminar flow past a circular cylinder with a perforated sheath[J]. Fluid dynamics,2003,38(2):203-213.

[4] HILL R J, JARVIE D M, ZUMBERGE J, et al. Oil and gas geochemistry and petroleum systems of the Fort Worth Basin[J]. AAPG Bulletin,2007,91(4):445-473.

[5] 李明飞,徐绯,窦益华. 爆轰冲击载荷作用下射孔段管柱动力响应分析[J]. 振动与冲击,2019,38(18):185-191.
LI Mingfei, XU Fei, DOU Yihua. Dynamic response analysis of perforated pipe string under detonation shock load[J]. Vibration and shock,2019,38(18):185-191(in Chinese).

[6] 吴焕龙,唐凯,彭科普,等. 聚能射孔弹侵彻应力砂岩穿深预测[J]. 钻采工艺,2020,43(2):135-138.
WU Huanlong, TANG Kai, PENG Kepu, et al. Prediction of penetration depth of shaped charge perforation stress sandstone[J]. Drilling and production technology,2020,43(2):135-138(in Chinese).

[7] 潘德凯,马峰,王树山. 矩形射孔弹射流形成机理的微元法数值分析研究[J]. 振动与冲击,2017,36(8):121-124.
PAN Dekai, MA Feng, WANG Shushan, et al. Numerical analysis of the formation mechanism of rectangular perforating projectile jet by infinite element method[J]. Vibration and shock,2017,36(8):121-124(in Chinese).

[8] SUNESON N H. Arkoma basin petroleum-past, present, and future[J]. Oklahoma City Geological Society,2012,63(1):38-70.

[9] 李明飞,窦益华,曹银萍,等. 射流轴向速度及套管应力的 ALE 三维仿真分析[J]. 力学季刊,2019,40(2):362-372.
LI Mingfei, DOU Yihua, CAO Yinping, et al. ALE 3D simulation analysis of jet axial velocity and casing stress[J]. Quarterly journal of mechanics,2019,40(2):362-372(in Chinese).

[10] 王成,付晓磊,宁建国. 起爆方式对聚能射流性能影响的数值分析[J]. 北京理工大学学报,2006,26(5):401-404.
WANG Cheng, FU Xiaolei, NING Jianguo. Numerical analysis of the influence of detonation mode on the performance of shaped charge jet[J]. Journal of Beijing Institute of Technology,2006,26(5):401-404(in Chinese).

[11] 雷方超. 新型药型罩结构下射孔弹聚能射流及侵彻深度研究[D]. 西安:西安理工大学,2019.

[12] 金玮玮,张昭,张洪武,等. 射孔枪射流形成的数值模拟与弹壳设计[J]. 塑性工程学报,2010,17(6):121-126.
JIN Weiwei, ZHANG Zhao, ZHANG Hongwu, et al. Numerical simulation of jet formation of perforating gun and design of cartridge case[J]. Journal of plastic engineering,2010,17(6):121-126(in Chinese).

[13] 白永超,盛选禹,尚奕彤. 油田用射孔弹穿深有限元分析与模拟[J]. 石油机械,2013,41(10):33-36.
BAI Yongchao, SHENG Xuanyu, SHANG Yitong. Finite element analysis and simulation of perforation depth for oil field[J]. Petroleum machinery,2013,41(10):33-36(in Chinese).

[14] 吴焕龙,杜明章,杨超,等. 射孔弹聚能射流侵彻钢靶的数值仿真与实验分析[J]. 爆破器材,2012,41(2):30-33.
WU Huanlong, DU Mingzhang, YANG Chao, et al. Perforation bullet shaped jet penetrating steel target of numerical simulation and experimental analysis[J]. Journal of blasting equipment,2012,41(2): 30-33(in Chinese).

[15] 李玉坤,叶贵根,仝兴华,等. 油气井套管射孔有限元动态仿真[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2008,32(4):114-117.
LI Yukun, YE Guigen, TONG Xinghua, et al. Dynamic finite element simulation of casing perforation in oil and gas Wells[J]. Journal of China University of Petroleum: natural science edition, 2008,32(4):114-117(in Chinese).

[16] 张先锋,陈惠武. 三种典型聚能射流侵彻靶板数值模拟[J]. 系统仿真学报,2007,19:4399-4401,4410.
ZHANG Xianfeng, CHEN Huiwu. Numerical simulation of three typical shaped charge jets penetrating a target plate[J]. Journal of system simulation,2007,19:4399-4401,4410(in Chinese).

[17] 王华坤. 基于 ALE 动网格的流固耦合分区算法及其在流致振动分析中的应用[D]. 上海:上海交通大学,2015.

(编辑　张璐)